

Identification d'un réseau hydrométrique pour le suivi des modifications climatiques dans la province de Québec

Identification of a hydrometric data network for the study of climate change over the province of Quebec

T. B.M.J. Ouarda, P. F. Rasmussen, J. F. Cantin, B. Bobée, R. Laurence et V. D. Hoang

Volume 12, numéro 2, 1999

URI : <https://id.erudit.org/iderudit/705359ar>
DOI : <https://doi.org/10.7202/705359ar>

[Aller au sommaire du numéro](#)

Éditeur(s)

Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE)

ISSN

0992-7158 (imprimé)
1718-8598 (numérique)

[Découvrir la revue](#)

Citer cet article

Ouarda, T. B., Rasmussen, P. F., Cantin, J. F., Bobée, B., Laurence, R. & Hoang, V. D. (1999). Identification d'un réseau hydrométrique pour le suivi des modifications climatiques dans la province de Québec. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 12(2), 425–448. <https://doi.org/10.7202/705359ar>

Résumé de l'article

Depuis une dizaine d'années, la communauté scientifique s'est beaucoup intéressée à l'hypothèse d'un réchauffement à l'échelle planétaire. De nombreuses études ont porté sur l'analyse de ces modifications climatiques éventuelles ainsi que sur la modélisation de leurs impacts sur les ressources en eau. Cependant, malgré l'attention croissante que reçoit le sujet des modifications climatiques, très peu de travail a été accompli pour mettre en place des réseaux de mesure spécialement conçus pour l'étude des modifications climatiques et leurs impacts sur les ressources en eau, et pour créer des bases de données adaptées à cet objectif. Cette tâche est encore plus nécessaire dans le cadre des réductions budgétaires auxquelles sont soumis les réseaux hydrométriques dans certains pays développés. Cet article présente les bases d'une étude dont l'objectif est la conception d'un réseau hydrométrique pour le suivi des modifications climatiques dans la province de Québec, Canada. Le but est d'identifier, afin de les conserver, les stations de jaugeage les plus adéquates pour accomplir cette tâche. L'article présente aussi une brève revue des types de modifications climatiques qui peuvent être observés et de certains tests qui existent pour leur détection et leur quantification. Une procédure bayésienne de détection des sauts de la moyenne a été sélectionnée sur la base de ses avantages théoriques, et appliquée aux séries de données des stations retenues au Québec.

Identification d'un réseau hydrométrique pour le suivi des modifications climatiques dans la province de Québec

Identification of a hydrometric data network for the study of climate change over the province of Quebec

TAHA B.M.J. OUARDA¹, P. F. RASMUSSEN¹, J.-F. CANTIN², B. BOBÉE^{1*}, R. LAURENCE², V.D. HOANG³ et G. BARABÉ³

Reçu le 25 février 1997, accepté le 25 septembre 1998**.

SUMMARY

The 1980s and 1990s contained most of the warmest years since the beginning of worldwide temperature recording nearly 140 years ago. Widely accepted estimates project that the earth's average temperature might increase by about 2°C over the next 100 years. It is also expected that, as a result of global warming, the frequency and intensity of floods and droughts may change. However, despite the increasing attention that the issue of climate change receives, there has been little effort to develop a systematic approach for the collection of relevant data, and to establish observational networks specifically designed for the analysis of climate variability and change and their impact on hydrologic regimes and water resources in general. This task is particularly important given the major network reductions that result from recent cut-backs in the funding of monitoring programs in Canada and other countries. This paper presents the results of a rigorous study that was carried out recently, and aimed at establishing a hydrometric network for the study of the attributes of climate change and variability across the province of Quebec (Canada) and their impact on water resources. The approach is based on identifying and maintaining stations that can help provide an understanding of the physical processes within the hydrological cycle and account for climate variations across the province. This network will be of fundamental importance in establishing scientific evidence of the magnitude and direction of possible shifts in climate patterns across the province. These aspects are of global significance and must be considered during the rationalization of monitoring net-

-
1. Chaire en Hydrologie Statistique, Institut national de la Recherche scientifique, INRS-Eau, 2800 rue Einstein, C.P. 7500, Sainte-Foy (Québec) G1V 4C7. Tél : (418) 654-2695. Fax : (418) 654-2600. E-mail : chaire_hydro@inrs-eau.quebec.ca.
 2. Environnement Canada, Division Monitoring et Technologies, Direction de l'Environnement atmosphérique, 100 boulevard Alexis-Nihon – suite 300, Saint-Laurent (Québec) H4M 2N8.
 3. Ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec, Direction du Milieu Hydrique, 150 boulevard René-Lévesque Est, 9^e étage, Québec (Québec) G1V 4H2.

* Correspondance.

** Les commentaires seront reçus jusqu'au 30 décembre 1999.

works. The results of the application of this procedure to the hydrometric network of the province of Quebec are presented. The paper presents also a brief review of the various types of non-stationarities that can be observed in hydrologic data series, and some of the current approaches that can be used for the detection of these non-stationarities. Several statistical tests and procedures have been proposed in the literature for the analysis of the characteristics of data samples and for hypothesis testing, for various types of non-stationarity. A Bayesian procedure, proposed by LEE and HEGHINIAN (1977) and generalized by BERNIER (1994), for the detection of shifts in the mean of hydrological and meteorological time-series is selected based on its theoretical advantages (FAUCHER *et al.*, 1997). The procedure is then applied for the analysis of all streamflow series of selected stations in the province of Quebec with the objective of extracting information on possible climatic changes. Results indicate the presence of significant non-stationarities for a number of the series analyzed. For five stations, the most probable date for the shift in the mean level falls in the period 1983-1985. Recommendations are made for future research activities.

Key-words: *hydrometric network, climate change, non-stationarity, bayesian analysis, hydrologic cycle, flow.*

RÉSUMÉ

Depuis une dizaine d'années, la communauté scientifique s'est beaucoup intéressée à l'hypothèse d'un réchauffement à l'échelle planétaire. De nombreuses études ont porté sur l'analyse de ces modifications climatiques éventuelles ainsi que sur la modélisation de leurs impacts sur les ressources en eau. Cependant, malgré l'attention croissante que reçoit le sujet des modifications climatiques, très peu de travail a été accompli pour mettre en place des réseaux de mesure spécialement conçus pour l'étude des modifications climatiques et leurs impacts sur les ressources en eau, et pour créer des bases de données adaptées à cet objectif. Cette tâche est encore plus nécessaire dans le cadre des réductions budgétaires auxquelles sont soumis les réseaux hydrométriques dans certains pays développés. Cet article présente les bases d'une étude dont l'objectif est la conception d'un réseau hydrométrique pour le suivi des modifications climatiques dans la province de Québec, Canada. Le but est d'identifier, afin de les conserver, les stations de jaugeage les plus adéquates pour accomplir cette tâche. L'article présente aussi une brève revue des types de modifications climatiques qui peuvent être observés et de certains tests qui existent pour leur détection et leur quantification. Une procédure bayésienne de détection des sauts de la moyenne a été sélectionnée sur la base de ses avantages théoriques, et appliquée aux séries de données des stations retenues au Québec.

Mots clés : *réseaux hydrométriques, modifications climatiques, non-stationnarité, analyse bayésienne, débit.*

1 – INTRODUCTION

La bonne gestion des ressources en eau et l'élaboration des plans de développement nécessite la disponibilité d'une base de données hydrométéorologiques fiables. Suite à la révision des programmes fédéraux (PILON *et al.*, 1996), les réseaux hydrométriques canadiens sont soumis à des réductions budgétaires

importantes. Cette situation étant irréversible, il importe d'effectuer cette réduction de façon rationnelle, c'est-à-dire de garder les stations de jaugeage les plus importantes pour le suivi du cycle de l'eau. Ceci permettra d'éliminer les stations qui ne participent que peu à notre connaissance des régimes hydrologiques. Lors de la rationalisation, il importe aussi de considérer une gamme de critères pour s'assurer que le réseau final réponde aux objectifs fixés. Certains objectifs peuvent avoir une importance prioritaire et doivent être considérés séparément. Les types de facteurs que l'on doit considérer lors d'un exercice de rationalisation sont les suivants :

1. *Objectifs de la station* : prévision des crues et étiages, étude environnementale, recherche, suivi des modifications climatiques, gestion des ouvrages, production hydroélectrique, navigation, faune, etc. ;
2. *Utilisateur* : Environnement Canada, ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec, autres ministères, compagnies hydroélectriques, consultants, municipalités, universités, etc. ;
3. *Facteurs hydrologiques* : longueur des séries, période d'acquisition des données, disponibilité des données en temps réel, régime, proximité de stations météorologiques et mesure de la qualité de l'eau, précision des données ;
4. *Facteurs hydrauliques* : correction de l'effet de glace, stabilité du contrôle, courbe de tarage ;
5. *Coûts* : coût d'exploitation ou de gestion, de la télémétrie, d'entretien, de traitement des données, etc. ; et
6. *Facteurs socio-économiques* : population, loisirs, activités économiques, etc.

Le réseau hydrométrique de la province de Québec, Canada, a subi des modifications majeures depuis sa première rationalisation en 1973 (VILLENEUVE *et al.*, 1973). Plusieurs stations ont été déplacées ou fermées et de nouvelles stations ont été ajoutées. Compte tenu des réductions budgétaires en cours, il est important de réduire les coûts d'acquisition et de transmission des données hydrométriques tout en maintenant un programme d'acquisition de données fiables. La répartition optimale des stations du réseau hydrométrique doit assurer l'obtention de données qui répondent aux besoins des utilisateurs actuels et futurs. Cette étude représente une partie des travaux en cours pour la détermination de la nouvelle configuration du réseau de mesure de la province de Québec (OUARDA *et al.*, 1996). Le présent travail concerne plus particulièrement le suivi des modifications climatiques.

La détection d'éventuelles modifications climatiques est une priorité d'Environnement Canada (EC). Le régime du cycle de l'eau étant l'une des manifestations majeures du climat, son suivi permet d'appréhender l'évolution de certains aspects climatiques et c'est dans cet esprit que doit être entrepris le redéploiement des réseaux de mesure. Idéalement, ce suivi doit s'effectuer sur des cours d'eau non régularisés et non influencés par des activités humaines d'envergure (telle que la coupe forestière, par exemple). Il s'agit plus particulièrement de déterminer le nombre et la répartition des stations hydrométriques requises afin de détecter toute modification climatique significative, et d'étudier l'évolution de la ressource résultant de ces modifications. Bien que la rationalisation du réseau soit orientée vers la diminution du nombre de stations existantes en raison des réductions de budget, les possibilités de déplacer certaines stations ou d'installer quelques nouvelles stations (en remplacement de celles qui seront supprimées) pour atteindre l'objectif visé ne doivent pas être exclues *a priori*.

2 – DÉTECTION DES MODIFICATIONS CLIMATIQUES

2.1 Types de modifications climatiques

Dans un rapport préparé pour l'Organisation Météorologique Mondiale, CAVADIAS (1992) identifie les différents types de modifications climatiques possibles et présente la classification suivante des évolutions possibles des variables climatiques :

1. Saut brusque de la moyenne ;
2. Changement graduel de la moyenne (pour une période donnée) ;
3. Succession de changements de la moyenne (*shifting levels*) ;
4. Tendence continue de la moyenne ;
5. Évolution cyclique ; et
6. Changement de la variance.

SOLOW (1988) indique qu'il est souvent difficile de distinguer entre les changements de types 1) et 2). En effet, l'existence réelle de changements brusques de la moyenne peut être contestée sur des bases physiques ; ce type de changement pouvant être considéré comme un changement *graduel* « assez rapide » de la moyenne. La définition des *shifting levels* a été donnée par SALAS et BOES (1980). En regroupant les différents types de changements de la moyenne, on peut considérer qu'il existe deux grands types de modification climatique à suivre :

- changement de la moyenne (incluant la tendance en saut si l'on accepte l'existence de tel changement) ; et
- changement de la variance (augmentation ou diminution).

Il est important de faire la distinction entre la variabilité climatique et les modifications climatiques. La première notion fait référence à la variabilité inhérente à tout processus stochastique stationnaire, alors que la seconde indique une altération des valeurs moyennes, à long terme, des caractéristiques statistiques de la série sur des intervalles de longue durée. La variabilité climatique décrit la fluctuation des valeurs saisonnières ou annuelles par rapport aux moyennes temporelles de référence, et implique alors l'hypothèse de stationnarité, alors que les modifications climatiques sont détectées sur de longues séries de données et reposent sur l'hypothèse d'un processus non stationnaire. Il est aussi relativement important de mentionner qu'un changement apparent de la moyenne peut en fait être dû tout simplement à des phénomènes de persistance de la corrélation. Ainsi, une modification qui est détectée sur 40 ans d'observations peut ne plus l'être si 100 ans de données sont disponibles, car des fluctuations à l'échelle de la décennie peuvent être naturellement présentes même si elles restent inexplicables. Cette considération nécessite une attention particulière lors de l'analyse des séries climatiques.

2.2 Techniques de détection

En raison de l'importance du problème de détection d'éventuelles modifications climatiques, plusieurs études ont été effectuées sur ce sujet. L'organisation météorologique mondiale (WMO) a présenté une synthèse d'un certain nombre de tests et de procédures utilisés pour la détection des modifications climatiques (WMO, 1966, 1988). SRIKANTHAN *et al.* (1983), SRIKANTHAN et STEWART (1991) et MITOSEK (1992) ont effectué des revues partielles des techniques utilisées pour la

détection de la variabilité et des modifications climatiques dans les séries temporelles hydrologiques. CAVADIAS (1992) a présenté une revue plus détaillée des approches disponibles et une liste d'applications dans le domaine. Parmi les tests les plus courants qui sont disponibles on peut citer le test des séquences (FISZ, 1963), les tests de Mann pour la tendance de la moyenne et pour la tendance de la variance (SNEYERS, 1990), les tests non-paramétriques de Kruskal-Wallis pour l'égalité des moyennes et des variances des sub-périodes (SNEYERS, 1990), le test du rapport de vraisemblance de Worsley pour la détection des sauts de la moyenne (WORSLEY, 1979), et le test du saut de la moyenne de Buishand (BUISHAND, 1982).

D'autres tests peuvent aussi être utilisés, tels que les tests basés sur les modèles ARIMA (*autoregressive integrated moving average*) (HIPEL et MCLEOD, 1994), le test de Fuller pour la non-stationnarité stochastique (FULLER, 1976 ; DICKEY et FULLER, 1979), et le test de Pettit (PETTIT, 1979). HUBERT *et al.* (1989) ont développé une procédure de segmentation des séries hydrométéorologiques et l'ont appliqué aux données de précipitations et de débits de l'Afrique de l'Ouest. MARONNA et YOHAI (1978) ont présenté un test bivarié pour la tendance, qui a été appliqué par LETTENMAIER *et al.* (1994) pour attribuer des tendances de débit à des tendances de précipitation. LETTENMAIER *et al.* (1994), KARL *et al.* (1996), et MEKIS et HOGG (1998) ont présenté des cadres régionaux pour l'application de différents tests aux données de précipitation et de débit en Amérique du Nord. D'autres techniques, qui ne représentent pas des tests statistiques au sens classique du terme, ont aussi été présentées dans la littérature récente. On peut notamment mentionner les procédures de LEE et HEGHINIAN (1977) et de BERNIER (1994) qui reposent sur l'approche bayésienne. FAUCHER *et al.* (1997) ont présenté une revue bibliographique compréhensive des tests et procédures de détection des différents types de non-stationnarité. Cette revue indique que la procédure bayésienne de LEE et HEGHINIAN (1977) et sa généralisation présentée par BERNIER (1994) se distinguent parmi les approches d'étude de la stationnarité de la moyenne. Ces procédures permettent non seulement d'étudier la validité d'une hypothèse de changement (tel qu'est le cas pour les tests d'hypothèse) mais aussi d'estimer les distributions de probabilité de la date d'un changement de moyenne et de l'amplitude de ce changement. La procédure de LEE et HEGHINIAN (1977) sera présentée en détail dans la section 5.

2.3 Indicateurs des modifications climatiques et variables à utiliser

Les principaux indicateurs du changement climatique sont les concentrations atmosphériques mondiales de gaz à effet de serre et les températures moyennes annuelles mondiales et canadiennes (Environnement Canada, 1995). On estime que la température moyenne annuelle mondiale a augmenté d'environ 0,5 °C depuis 1895 et que la température moyenne annuelle canadienne a augmenté de 0,9 °C entre 1895 et 1993 (Environnement Canada, 1995). Même si, au Canada, on a globalement observé une tendance au réchauffement, certaines régions de la côte Est ont subi un refroidissement depuis 1950 environ. Les concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre représentent des indicateurs de modifications climatiques reliés aux activités humaines ou aux sources anthropiques.

Le choix des variables à utiliser dépend des comportements à étudier et du type de variation qu'on cherche à caractériser. La détection des modifications climatiques peut être effectuée en utilisant des variables associées aux domaines

de l'hydrologie et des ressources en eau. BODEN *et al.* (1994) ont publié un résumé des données utilisées pour l'étude des modifications climatiques. Ce document contient, entre autres, des synthèses de dix analyses de données de précipitations de différentes parties du monde incluant le Canada. MITOSEK (1992) indique que les variables les plus adaptées pour le suivi des modifications climatiques sont, par ordre d'importance :

1. le débit des rivières ;
2. le niveau des lacs ;
3. les précipitations ;
4. la température de l'air ;
5. le niveau des rivières ;
6. la température de l'eau ;
7. la date de rupture du couvert de glace ;
8. la durée saisonnière du couvert de glace ; et
9. le niveau des eaux souterraines,

Les quatre premières variables étant les variables prioritaires et les cinq suivantes étant des variables secondaires. KITE et HARVEY (1992) identifient aussi l'évaporation, la végétation, l'humidité du sol, la gestion des structures hydrauliques, la date d'occurrence des événements extrêmes, les indices de la qualité de l'eau et l'état des glaciers comme facteurs à considérer dans l'analyse et la compréhension des modifications climatiques. LAWFORD (1992) ajoute à cette liste de variables les données concernant le transport des sédiments dans les rivières.

PERREAULT *et al.* (1998) ont considéré les séries de précipitations annuelles et les séries d'apports naturels (d'eau) pour étudier l'homogénéité des conditions climatiques dans le bassin des Grands Lacs. Certaines études ont porté sur les séries d'apports naturels pour étudier les tendances climatiques (QUINN et GUERRA, 1986), ou sur des séries de données équivalentes, telles que les séries historiques d'apports énergétiques (PERREAULT *et al.*, 1996). D'autres études ont porté sur les séries de débit des rivières (LETTENMAIER *et al.*, 1994). Cependant, les séries des débits maximum et minimum annuels semblent contenir des « bruits » assez importants qui risquent de masquer les modifications climatiques quand elles sont présentes. Par conséquent, il est recommandé d'utiliser les séries des débits moyens annuels ou des débits maximums ou minimums de x jours consécutifs. Ces séries permettent de « filtrer » les bruits et phénomènes de haute fréquence et sont, par conséquent, plus adéquates pour ce genre d'analyse.

3 – MÉTHODOLOGIE DE RATIONALISATION D'UN RÉSEAU HYDROMÉTRIQUE POUR LE SUIVI DE MODIFICATIONS CLIMATIQUES

3.1 Critères de sélection du réseau de bassins hydrométriques de référence

La documentation et l'étude des modifications climatiques et de leurs impacts sur les ressources en eau à l'échelle nationale est l'une des priorités d'Environnement Canada. Reconnaisant l'importance de disposer de bonnes séries de données historiques, le Canada a établi, au début des années soixante, un réseau de

référence de 6 stations **climatiques**. Depuis, le réseau climatique s'est développé pour inclure actuellement 254 stations à travers le pays. En 1991, un atelier a eu lieu pour examiner l'intérêt de l'utilisation des données hydrologiques pour la détection des modifications climatiques (KITE et HARVEY, 1992). Cet atelier a permis de mettre en évidence le besoin de concevoir un réseau **hydrométrique** national pour le suivi des modifications climatiques. Une étude a alors été décidée pour identifier, afin de les conserver, les stations de jaugeage les plus adéquates pour accomplir cette tâche. Cette initiative est d'autant plus importante qu'une réduction des réseaux de mesure est prévue. Il est donc capital de bien identifier les stations ayant le plus grand potentiel et de les conserver dans le cadre d'un programme spécialement destiné à la détection des modifications climatiques. Ce réseau, encore en phase d'élaboration, est connu sous le nom de « réseau de bassins hydrométriques de référence » (Environnement Canada, 1996b). On doit souligner qu'un travail semblable a déjà été effectué aux États-Unis d'Amérique (SLACK et LANDWEHR, 1992) menant à la sélection de 1 659 sites à travers le pays. Ce réseau est connu sous le nom de *Hydro-Climatic Data Network*.

La sélection initiale des quelque 2 500 stations hydrométriques du territoire canadien pour l'identification du réseau national de bassins hydrométriques de référence est basée sur les critères mentionnés ci-dessous. Une station qui ne vérifie pas l'un des critères de sélection est automatiquement éliminée durant cette première phase de définition du réseau. Les critères utilisés sont les suivants :

1. la station est présentement active (enregistrement non discontinu) ;
2. la station possède un historique d'au moins 20 années de données. Cette exigence pourrait être assouplie si la station est la seule au sein d'une région géographique ou climatique donnée ;
3. les structures de contrôle (barrages, réservoirs) affectent moins de 5 % de la surface totale ou du débit total du bassin ;
4. le bassin n'est pas urbanisé. Moins de 10 % de la surface du bassin est aménagée ou modifiée par rapport aux conditions naturelles. Sinon, le bassin doit être stable : c'est-à-dire que très peu de changements ont eu lieu dans le bassin pendant la durée d'exploitation de la station ;
5. moins de 5 % des données ont été reconstituées. Les séries ne sont pas obtenues par addition ou soustraction de données à partir d'autres séries ;
6. la qualité des données est bonne : approximativement 95 % des données enregistrées sont d'un niveau de précision assez élevé ; et
7. les prévisions futures ne prévoient pas de transformations majeures dans le bassin, telles qu'une déforestation (pour un horizon de 5 à 20 ans, si possible).

Le problème des modifications climatiques est, en général, un problème posé à l'échelle régionale, impliquant qu'une modification qui peut être détectée dans une station devrait, en principe, pouvoir aussi être détectée dans une autre station de la même région. Ce degré de liberté supplémentaire devrait nous donner un certain niveau de flexibilité et nous permettre de choisir les stations qui possèdent de longues séries de données fiables. Cependant, le changement qui a déjà eu lieu au Canada (en moyenne, environ 1 °C durant les dernières 100 années) est reconnu ne pas être uniforme à travers l'ensemble du pays (GULLETT et SKINNER, 1992). Une bonne répartition spatiale du réseau de stations devient donc un facteur important. On doit également noter que certaines modifications climatiques à petite échelle (phénomènes non globaux) peuvent avoir lieu ; ainsi, on

peut parfois observer un refroidissement local alors que la région est en train de subir un réchauffement global. Une attention particulière devra être portée à ce phénomène.

3.2 Réseau hydrométrique pour le suivi des modifications climatiques au Québec

Le réseau hydrométrique présenté dans ce qui suit a pour objectif le suivi des modifications climatiques dans la province de Québec. Le but est d'identifier, afin de les conserver, les stations de jaugeage les plus adéquates pour accomplir cette tâche. La conception de ce réseau permet de commencer à faire certaines analyses sur les données de la province de Québec, en attendant que le réseau national soit complètement défini. La conception de ce réseau provincial est en grande partie guidée par les travaux en cours pour le développement du réseau de bassins hydrométriques de référence. Ainsi, durant l'identification des stations du réseau du Québec, il est souhaitable de respecter autant que possible les critères de sélection nationaux dans le but de conserver une certaine uniformité des approches. Cependant, cet objectif peut être atteint tout en tenant compte des spécificités de la province du Québec (étendue, etc.). Ainsi, la condition concernant l'activité de la station n'est pas nécessairement rédhibitoire et peut être omise dans le cas d'une station d'intérêt particulier. En effet, une station qui a été fermée depuis quelques années et dont le bassin n'a pas subi de changements durant ces années peut être réactivée et utilisée pour le suivi des modifications climatiques, spécialement si elle possède déjà une série de longueur adéquate. D'autre part, le critère de longueur des séries (20 ans ou plus) peut être plus restrictif si le nombre de stations satisfaisant le critère est assez large. L'augmentation du critère de longueur minimum des séries à 30 ans, par exemple, peut faciliter le processus d'élimination tout en garantissant que l'on retienne suffisamment de séries d'autant plus utiles qu'elles sont plus longues.

Il faut souligner l'importance d'utiliser les stations où les données ne sont pas influencées par les activités humaines. À cet égard, les stations du Grand Nord de la province doivent être particulièrement privilégiées. Il faut cependant trouver un équilibre entre les stations du Nord, peu nombreuses mais caractérisées par des données de bonne qualité, et les stations du Sud, plus nombreuses mais qui sont très influencées par des activités humaines afin de disposer d'une bonne répartition spatiale des stations. D'autre part, l'influence du débit est reliée aux variables étudiées : ainsi quand on considère des séries d'apports (volumes) annuels, l'influence journalière ou mensuelle devient peu importante. Une station ne devrait donc pas être systématiquement rejetée parce que le cours d'eau qu'elle représente est influencé. Cependant, à conditions égales, il est préférable de retenir des stations non influencées. Ne seront retenues que les stations en service toute l'année afin de pouvoir mettre en évidence le caractère non uniforme selon les saisons des modifications climatiques détectées sur le territoire canadien (Environnement Canada, 1995).

La proximité d'une station climatique peut représenter un atout pour une station hydrométrique. En effet, la station climatique duale peut être utilisée pour la validation des données, l'estimation éventuelle de données manquantes ou, simplement pour mieux analyser toute modification climatique détectée. Ainsi, la superposition géographique du réseau hydrométrique de référence du Québec avec la partie québécoise du réseau de référence des stations climatiques permet un choix rationnel des stations hydrométriques pour le suivi.

La surface du bassin versant est aussi un facteur important à considérer. Il est recommandé de garder les stations situées sur des rivières drainant de grands bassins versants ; la grande taille d'un bassin de drainage peut en effet agir comme un filtre vis-à-vis des variations locales qui ne sont pas d'intérêt pour le suivi des modifications climatiques ; les petits bassins versants pouvant enregistrer tous les bruits et toutes les variations microclimatiques, camouflant ainsi des phénomènes de plus grande importance. De plus, les petits bassins versants (dans le cadre de la province de Québec ceci pourrait indiquer les bassins couvrant moins de 500 km²) sont plus vulnérables aux phénomènes naturels imprévus et à l'influence humaine : par exemple un feu de forêt même relativement modeste pourrait modifier le régime hydrologique de petits bassins versants, rendant du même coup la station inutile pour le suivi des modifications climatiques. Par contre, les grands bassins versants sont davantage à l'abri de telles modifications hydrologiques.

Un autre détail relié à la spécificité géographique de la province de Québec concerne le suivi de certaines rivières particulières. À titre d'exemple, on peut mentionner le cas de la rivière Richelieu qui a une importance particulière car c'est une rivière transfrontalière, reliée aux Grands Lacs (donc permettant leur suivi), possédant une longue série d'observations et drainant un grand bassin dont une partie se trouve aux États-Unis. Cependant, des stations situées sur de telles rivières peuvent aussi être maintenues dans le cadre d'autres programmes que le suivi des modifications climatiques.

4 – APPLICATION ET RÉSULTATS

4.1 Base de données

L'application des critères de sélection présentés dans la section précédente s'est avérée être assez complexe. En effet, le processus de filtrage proposé pré-suppose une connaissance détaillée des caractéristiques et de l'historique de chaque station du réseau. Une grande partie de cette information est peu accessible ou encore non disponible. Le réseau de base de la province de Québec, couvrant une surface de 1 540 680 km², est constitué de stations financées totalement ou partiellement par le ministère fédéral, et de stations financées par le ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec (MEFQ). D'autres stations faisant partie des réseaux d'Hydro-Québec ou de la Société Alcan existent sur le territoire de la province. Ces dernières stations sont cependant d'un intérêt limité pour le problème que nous traitons puisqu'elles sont presque toujours situées au voisinage des centrales hydroélectriques et sont donc très influencées. La base de données qui a été créée contient les caractéristiques de 182 stations financées totalement ou partiellement par le ministère fédéral, ainsi que l'information concernant les 122 stations financées par le MEFQ et majoritairement situées sur des rivières influencées.

Les données recueillies pour les stations de la province sont les suivantes : numéro fédéral et provincial de la station, nom complet de la station, source de financement, exploitant, type de données enregistrées, surface du bassin drainé, type de régime hydrologique (rivière naturelle ou influencée), année du début des enregistrements, type d'instrument de mesure, nombre de déplacements de la

station, latitude, longitude, débit moyen, existence de radio transmission, information sur les coûts d'exploitation, pourcentage de la surface totale ou du débit total affecté par les ouvrages de contrôle, pourcentage de la surface du bassin qui est urbanisée ou aménagée, stabilité du bassin, pourcentage de données qui sont estimées, niveau de précision des données enregistrées, qualité globale des données (qualité de la courbe de tarage, effet de glace, stabilité de contrôle ou stabilité du lit), et prévisions d'aménagement du bassin, ainsi que toute autre information qui pourrait s'avérer utile. Les données reliées à la qualité des données ne sont pas toujours disponibles pour les stations financées par le MEFAQ.

4.2 Application et résultats

Après la préparation de la base de données, la première étape de l'analyse a consisté à appliquer une série de filtres automatiques à l'ensemble des 304 stations de l'étude. Le premier filtre sélectionne les stations pour lesquelles les conditions suivantes sont satisfaites :

1. station de mesure de débit ;
2. conditions naturelles ;
3. longueur de la série d'au moins 20 ans.

Une liste de 76 stations a ainsi été retenue. Si l'on considère les stations ayant au moins 25 ans (respectivement 30 ans) de données on obtient 51 (respectivement 30) stations. Il est important de conserver les résultats intermédiaires qui pourraient être utiles lors de la détermination du réseau des bassins hydrométriques de référence. Une évaluation détaillée s'impose pour toutes les stations identifiées durant cette étape ainsi que toutes autres stations d'intérêt. Ces stations sont classées par région hydrographique et assurent une bonne représentation spatiale des différentes régions de la province de Québec. La figure 1 représente la carte des différentes régions hydrographiques du Labrador (Terre Neuve) et de la province de Québec définies par le MEFAQ (1994).

Trois indices d'évaluation sont déterminés pour chaque station, pour refléter les trois critères suivants :

1. la stabilité de contrôle (stabilité du lit) ;
2. l'effet de glace ; et
3. le niveau de précision de la courbe de tarage.

La valeur des indices d'évaluation varie entre 0 et 10, des valeurs élevées représentant les meilleures conditions. Pour l'effet de glace, la valeur maximale de l'indice est associée aux sites où le pourcentage de correction du débit observé pour obtenir le débit réel est inférieur à 15 %. Des valeurs entre 30 % et 50 % sont associées à une valeur de l'indice de l'ordre de 5 et les corrections dépassant 50 % correspondent à un indice de 2. L'indice associé aux courbes de tarage reflète le niveau d'extrapolation des débits minima et maxima par rapport au débit jaugé. Les extrapolations faibles (inférieures à l'ordre de grandeur du débit jaugé de chaque côté de la courbe) sont associées à un indice de l'ordre de 10. Les extrapolations moyennes (une à deux fois l'ordre de grandeur du débit) sont associées à des valeurs de l'indice de l'ordre de 5, et les extrapolations fortes (plus de 2 fois le débit) sont représentées par des indices de l'ordre de 2. Il est important de souligner que l'effet de glace représente une contrainte qui ne peut être rigoureusement respectée sous peine d'écarter la majorité des stations, alors que l'erreur due à l'effet de glace est souvent faible comparée à d'autres types d'erreurs.

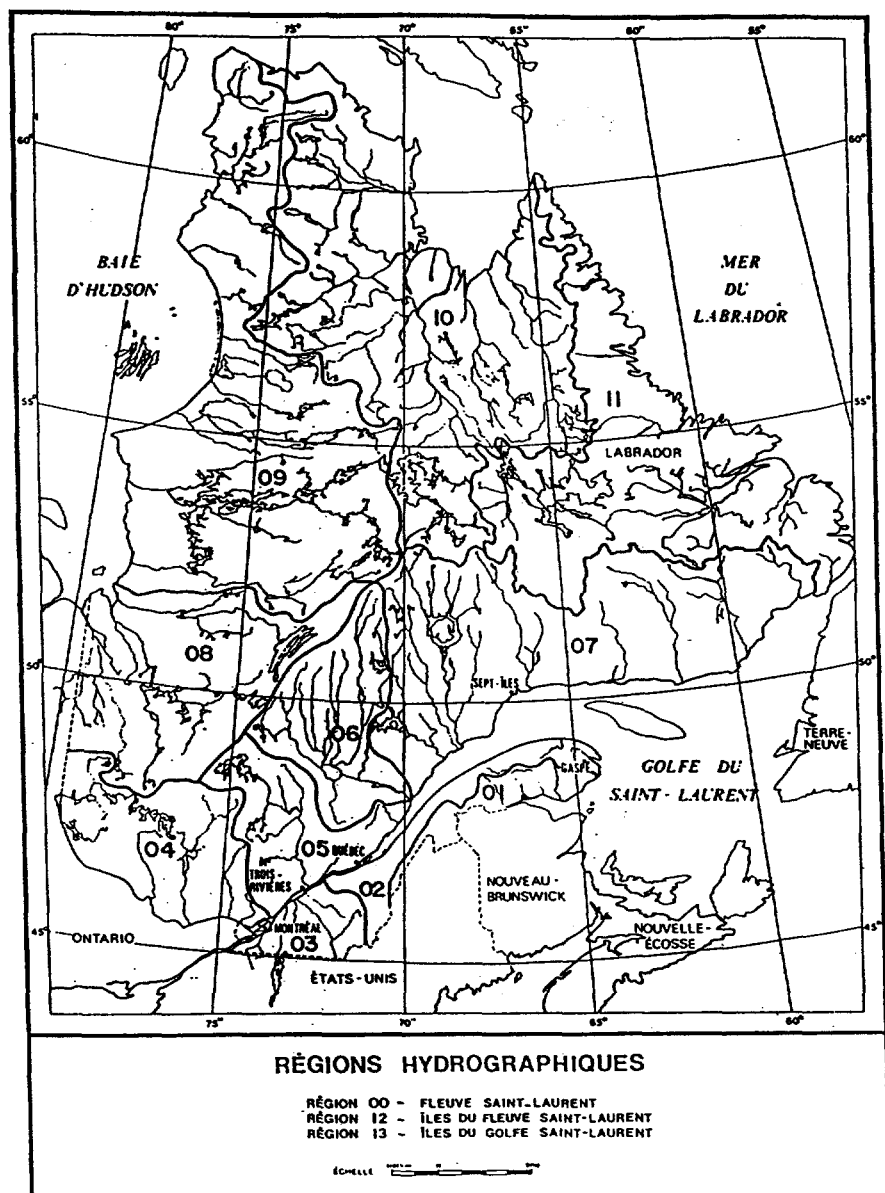


Figure 1 Carte des différentes régions hydrographiques du Labrador et de la province de Québec (MEFQ, 1994).

Hydrographic regions of Labrador and the province of Quebec defined by the Quebec Ministry of the Environment (MEFQ, 1994).

Par ailleurs, la sélection de stations représentatives des régions agricoles, part importante du Sud de la province se révèle délicate en raison du changement de régime causé par les activités d'irrigation et de drainage, et des différentes structures de contrôle situées sur les rivières des bassins de cette région. Il est convenu qu'une station ne devrait pas être écartée automatiquement si elle est située dans une région agricole. En effet, si le régime a été stable durant la période d'enregistrement de la station et s'il n'y a pas de changement prévu pour le futur (dû aux activités agricoles), la série de données enregistrée à cette station sera considérée comme ayant une qualité adéquate pour l'étude des modifications climatiques et de leurs impacts sur la ressource en eau de la région.

L'étape suivante consiste à effectuer une évaluation individuelle de chacune des stations identifiées dans l'étape précédente. La liste de 30 stations considérées est préalablement étendue pour inclure 10 stations supplémentaires sélectionnées dans les régions géographiques sous-représentées et vérifiant la majorité des critères mentionnés précédemment. Il est important de mentionner que les 10 stations ajoutées représentent des régions qui seraient sous-représentées même si on considère la liste de 76 stations identifiées au début de cette section. Il est aussi décidé de considérer les 16 stations témoins identifiées par le MEFAQ (OUARDA *et al.*, 1996) et dont 6 figurent déjà dans la liste de 30 stations retenues.

Tableau 1 Liste de stations retenues dans le cadre du réseau de suivi des changements climatiques de la province de Québec.

Table 1 List of stations retained for the study of the attributes of climate change across the province of Quebec.

N° d'identification	N° provincial ¹	N° fédéral	Nom de la station	Surface (km ²)	Début d'enreg.	Q Moyen (M ³ /s)	Télémerite ⁴
1	020602 ²	01BH005	Darmouth	645	1970	14,6	1
2	022003 ²	02QA002 ³	Rimouski	1 610	1962	31,5	1
3	023401	02PJ007 ³	Beaurivage	704	1925	14,4	1
4	030234	02OE027 ³	Eaton	642	1953	13,1	1
5	040814	02LH004 ³	Picanoc	1 290	1926	18,6	0
6	040830	02LG005	Gatineau	6 840	1974	127	1
7	050119	02NF003 ³	Matawin	1 390	1931	24,1	0
8	050135	02NE011 ³	Croche	1 570	1965	29,5	1
9	050409	02PB006 ³	Sainte-Anne	642	1965	19	0
10	061502	02RG005 ³	Metabetchouane	2 280	1964	46,4	0
11	061901 ²	02RF001 ³	Chamouchouane	15 300	1915	298	1
12	062101	02RD002 ³	Mistassibi	9 320	1953	240	1
13	072301 ²	02UC002 ³	Moisie	19 000	1965	429	1
14	073801 ²	02VC001 ³	Romaine	13 000	1956	298	1
15	080101 ²	04NA001 ³	Harricana	3 680	1933	59,5	0
16	095003	03FA003	Lac des Loups Marins	8 390	1974	192	1
17	103605	03KC004 ³	Aux Mélézes	42 700	1965	615	1
18	104001	03MB002 ³	À la Baleine	29 800	1956	515	1
19	104803	03MD001	George	24 200	1975	520	1

1. Les deux premiers chiffres du numéro provincial indiquent la région hydrographique.

2. Stations stratégiques identifiées par le MEFAQ.

3. Stations possédant au moins 30 ans d'enregistrements.

4. La valeur 1 indique la disponibilité de radio transmission des données, la valeur 0 indique le contraire.

Ces dernières stations sont considérées comme très importantes par le MEFQ et par conséquent, seront automatiquement retenues lors du processus de rationalisation. La majorité de ces stations stratégiques sont utilisées pour le calcul des apports en eau et la surveillance des crues et possèdent des séries adéquates pour le suivi des modifications climatiques. Partant de la liste de stations ainsi identifiées, compte tenu des critères précédemment présentés et du besoin de sélectionner des stations représentant une bonne répartition spatiale, une liste de 19 stations a été retenue (*tableau 1*). Cette liste inclut 15 stations de la liste des 30 stations décrites ci-dessus et 4 stations supplémentaires évaluées individuellement. Ces dernières sont surtout caractérisées par la bonne qualité de leur courbe de tarage, l'absence de projets futurs dans la région (pas de nouvel aménagement), la taille relativement grande de leur bassin de drainage, une erreur marginale due à l'effet de glace, un emplacement géographique adéquat et de séries relativement longues (mais moins de 30 ans de données). La figure 2 représente la carte des différentes régions éoclimatiques de la province de Québec (Environnement Canada, 1989) ainsi que la répartition des 19 stations retenues. Les 19 stations permettent globalement de représenter toutes les régions géographiques et éoclimatiques de la province de Québec.

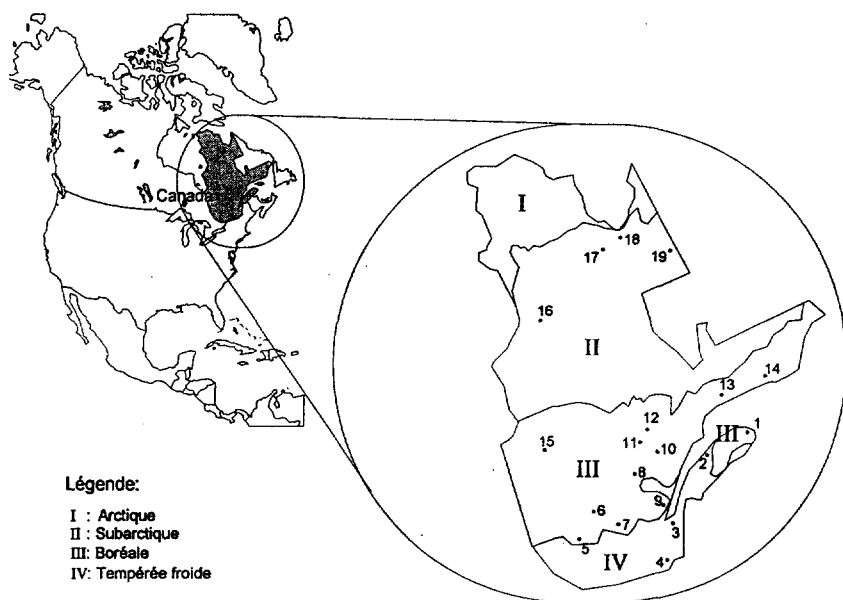


Figure 2 Régions éoclimatiques du Québec et répartition des stations retenues.
Ecoclimatic regions of Quebec and location of retained stations.

Il faut souligner que les deux premiers chiffres du numéro provincial de chaque station indiquent la région hydrographique à laquelle la station appartient (*tableau 1*). Toutes les régions hydrographiques de la province de Québec sont relativement bien représentées, sauf la région 1 (sud de la Gaspésie) pour laquelle aucune station n'a été retenue. Dans cette région, les rivières sont typiquement larges, peu profondes, et mobiles (très instables) à cause de la nature

de leurs lits souvent sableux ou graveleux. Cependant, la région 2 (nord de la Gaspésie et bas Saint-Laurent), géographiquement proche de la région 1 et caractérisée par des stations relativement plus stables, est bien représentée. La région 3 avec une seule station n'est pas très bien représentée non plus. Cette région a une superficie relativement petite et est caractérisée par des niveaux d'urbanisation et d'activité agricole très élevés. La station Eaton retenue dans cette région est une station qui a été très bien étudiée dans le passé dans le cadre de la Décennie Hydrologique Internationale (TREMBLAY, 1976).

Il faut enfin noter que 6 des 19 stations sélectionnées figurent dans la liste des 16 stations stratégiques que le ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec a spécifié comme stations à ne pas éliminer dans le cadre de l'étude de rationalisation du réseau hydrométrique du Québec (OUARDA *et al.*, 1996).

5 – ANALYSE BAYÉSIENNE DES SÉRIES CHOISIES

Le but de cette section est de présenter une méthode de détection d'un type de modification climatique et de l'appliquer aux séries des débits moyens annuels des stations retenues pour la province du Québec.

5.1 Bases théoriques

La procédure bayésienne proposée par LEE et HEGHINIAN (1977) a été retenue pour détecter les changements de la moyenne dans les séries de données. En partant de l'hypothèse qu'un changement de moyenne est effectivement présent dans la série, la procédure calcule la probabilité que ce changement survienne à un instant donné, et détermine la date t pour laquelle la probabilité de réalisation du changement est maximale. Les bases théoriques de la méthode sont présentées brièvement dans cette section. Pour un exposé complet de la méthode et de ses hypothèses, le lecteur pourra se référer à LEE et HEGHINIAN (1977), et BERNIER (1994).

Si l'on fait l'hypothèse qu'aucune information n'est disponible *a priori*, on considère une série de n valeurs de la variable aléatoire $X : X_1, X_2, \dots, X_n$ correspondant aux observations pour différents pas de temps. On suppose que la série (X_1, X_2, \dots, X_n) des n valeurs de la variable aléatoire est composée de deux parties $(X_1, X_2, \dots, X_\tau)$ et $(X_{\tau+1}, \dots, X_n)$ dont les moyennes respectives sont μ et $\mu + \delta$. Notre objectif est de dégager des conclusions concernant τ et δ , qui sont respectivement la date et l'amplitude du changement de la moyenne. Un modèle représentant la structure de la séquence X_1, X_2, \dots, X_n est donné par :

$$X_i = \begin{cases} \mu + \varepsilon_i, & i = 1, 2, \dots, \tau \\ \mu + \delta + \varepsilon_i, & i = \tau + 1, \dots, n \end{cases} \quad (1)$$

où les ε_i , ($i = 1, \dots, n$), sont indépendants et normalement distribués avec une moyenne nulle et une variance constante σ^2 . Dans ce modèle on suppose qu'aucun changement de variance σ^2 n'est présent. En faisant certaines hypothèses sur les distributions non informatives *a priori* des variables indépendantes τ ,

μ , δ et σ du modèle (1), LEE et HEGHINIAN, (1977) donnent la fonction densité de probabilité *a posteriori* de τ :

$$f(\tau|x_1, \dots, x_n) \propto \left[\frac{n}{\tau(n-\tau)} \right]^{1/2} [R(\tau)]^{-(n-2)/2}, \quad \tau \in \{1, 2, \dots, n-1\} \quad (2)$$

où :

$$R(\tau) = \left[\sum_{i=1}^{\tau} (x_i - \bar{x}_{\tau})^2 + \sum_{i=\tau+1}^n (x_i - \bar{x}_{n-\tau})^2 \right] \left[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_n)^2 \right]^{-1} \quad (3)$$

et, \bar{x}_{τ} , $\bar{x}_{n-\tau}$ et \bar{x}_n représentent respectivement les moyennes des premières τ observations, des dernières $n - \tau$ observations et de la série entière.

L'examen de la distribution discrète $f(\tau|x_1, \dots, x_n)$ nous permet d'identifier la date correspondant à la probabilité maximum de changement de la moyenne. L'interprétation des résultats pour les dates τ ayant lieu vers le début ou la fin de la période d'enregistrement ($\tau = 1, 2, 3$, ou $n-3, n-2, n-1$) doit être effectuée avec précaution étant donné que le changement de moyenne est estimé en utilisant un nombre limité d'observations. La distribution *a posteriori* de δ peut être utilisée pour estimer le niveau de changement de la moyenne. LEE et HEGHINIAN (1977) ont démontré que la distribution conditionnelle *a posteriori* $f(\delta|\tau, x_1, \dots, x_n)$ de δ , étant donné τ , est une distribution non centrale de Student avec une moyenne $\mu_{\tau}(\delta)$, une variance $\sigma_{\tau}^2(\delta)$ et $(n-2)$ degrés de liberté. Une expression pratique de $f(\delta|\tau, x_1, \dots, x_n)$ peut être déduite de la distribution de Student non centrée comme indiqué par EPSTEIN (1985) :

$$f(\delta|\tau, x_1, \dots, x_n) = \frac{(n-2)^{-1/2}}{\sigma_{\tau}(\delta) B\left(\frac{1}{2}, \frac{n-2}{2}\right)} \left[1 + \frac{(\delta - \mu_{\tau}(\delta))^2}{(n-2)\sigma_{\tau}^2(\delta)} \right]^{-\frac{n-1}{2}} \quad (4)$$

où $B(x, y)$ est la fonction bêta définie par $B(x, y) = \Gamma(x)\Gamma(y)/\Gamma(x+y)$, et où $\Gamma(x) = (x-1)!$ lorsque x est entier, est la fonction gamma. Des estimations de la moyenne et de la variance de la distribution $f(\delta|\tau, x_1, \dots, x_n)$ sont données par :

$$\hat{\mu}_{\tau}(\delta) = \bar{x}_{n-\tau} - \bar{x}_{\tau} \quad \text{et} \quad \hat{\sigma}_{\tau}^2(\delta) \approx \frac{nR(\tau)}{\tau(n-\tau)(n-2)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_n)^2 \quad (5)$$

Le niveau de signification de l'amplitude d peut être estimé en utilisant l'intervalle de crédibilité bayésien $C_{1-\alpha}(\delta) = [a, b]$ qui représente les valeurs que peut prendre l'amplitude du changement à un niveau de crédibilité $100(1 - \alpha)\%$. Une expression de cet intervalle symétrique a été proposée par BERGER (1985).

$$\Pr\{a \leq \delta \leq b\} = \int_a^b f(\delta|\tau, x_1, \dots, x_n) d\delta = 1 - \alpha \quad (6)$$

où

$$\Pr\{\delta \leq a\} = \Pr\{\delta \geq b\} = \alpha/2$$

et où $f(\delta|x_1, \dots, x_n)$ est la distribution inconditionnelle *a posteriori* de δ obtenue comme une moyenne pondérée de distributions de Student (LEE et HEGHINIAN, 1977).

$$f(\delta|x_1, \dots, x_n) = \sum_{\tau=1}^{n-1} f(\delta|\tau, x_1, \dots, x_n) \otimes f(\tau|x_1, \dots, x_n) \quad (7)$$

Cette distribution ne dépend pas de τ et peut donc être utilisée pour faire des inférences sur l'amplitude du changement sans avoir recours aux hypothèses classiques de connaissance *a priori* de la date de changement. Si on accepte de représenter, de façon sommaire, la distribution $f(\delta|x_1, \dots, x_n)$ par l'intervalle de crédibilité bayésien $C_{1-\alpha}(\delta)$ alors une valeur spécifique δ_0 de δ peut être considérée plausible si $\delta_0 \in \hat{C}$. Ceci nous permet d'examiner si la valeur $\delta_0 = 0$, représentant l'hypothèse d'absence de changement de la moyenne, est crédible en examinant si la valeur δ_0 appartient à l'intervalle $C_{1-\alpha}(\delta)$.

La procédure bayésienne de LEE et HEGHINIAN (1977) a été généralisée par BERNIER (1994) qui a utilisé des distributions conjuguées *a priori* avec des paramètres supplémentaires. BERNIER (1994) a aussi considéré trois types de changements de la moyenne : un saut brusque, une tendance linéaire, et une succession de deux sauts brusques de la moyenne.

5.2 Application de la méthode

La procédure présentée ci-dessus a été programmée dans l'environnement MATLAB (The MathWorks Inc., 1997) et appliquée aux 19 stations retenues dans le cadre de cette étude. Les données utilisées dans cette analyse sont les débits moyens annuels pour toutes les stations sélectionnées et sont extraites de la base de données HYDAT (version 4.94) avec de l'information allant jusqu'en 1994 (Environnement Canada, 1996a). Les figures 3 à 6 illustrent les résultats pour certaines des stations retenues. Pour chaque station, deux graphiques ont été tracés représentant la fonction de probabilité *a posteriori* de la date de changement et la fonction de probabilité inconditionnelle *a posteriori* de l'amplitude de la rupture (la probabilité de changement versus la date d'enregistrement et versus le niveau de changement). Dans ces graphiques, τ représente la date du changement et δ représente l'amplitude du changement.

Certaines indications assez significatives de non-stationnarité ont été détectées dans certaines des séries de débits moyens annuels. Ainsi pour la station 13 (tableau 1), l'année 1984 représente la date la plus probable d'occurrence d'une non-stationnarité. Des dates voisines ont aussi été détectées pour d'autres stations : l'année 1985 pour les stations 14, 18 et 19, et l'année 1983 pour la station 1. L'analyse a aussi démontré qu'en supposant que la série de la station 15 admet effectivement une non-stationnarité de la moyenne, la date la plus probable du changement est 1942. Pour la station 8, cette date est l'année 1977.

Pour la station 12 la distribution *a posteriori* de l'amplitude de la rupture est bimodale ce qui pourrait parfois indiquer la présence d'un double changement de la moyenne. Il est difficile de conclure à ce niveau si une certaine cohérence régionale existe au niveau de la date la plus probable du changement. Rappelons que PERREAULT *et al.* (1996) ont identifié l'année 1984 comme étant l'année la plus probable pour un changement de la moyenne des apports énergétiques agrégés du parc d'équipements d'Hydro-Québec. Cependant, avant de formuler une conclusion sur ce sujet, il convient d'effectuer une étude détaillée des séries de données, et de confirmer ces résultats à travers l'utilisation d'autres tests appropriés.

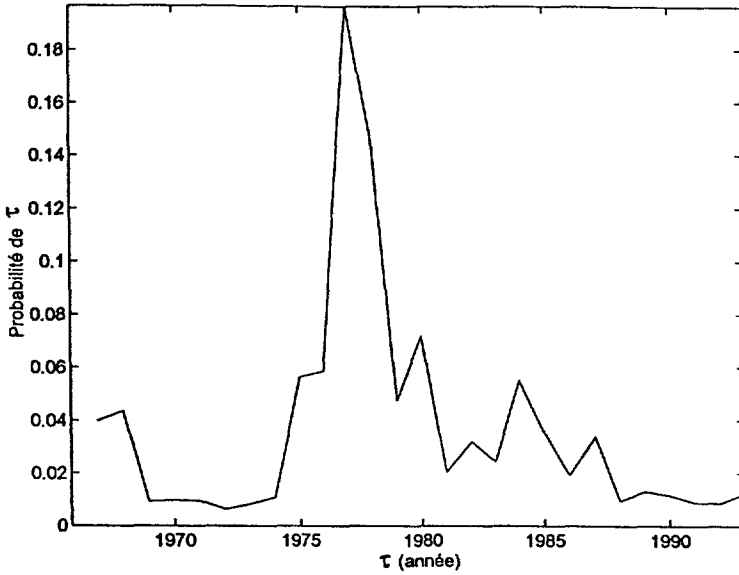


Figure 3a Fonction de probabilité *a posteriori* de la date de changement pour la station 8.

Posterior probability function of change date for station 8.

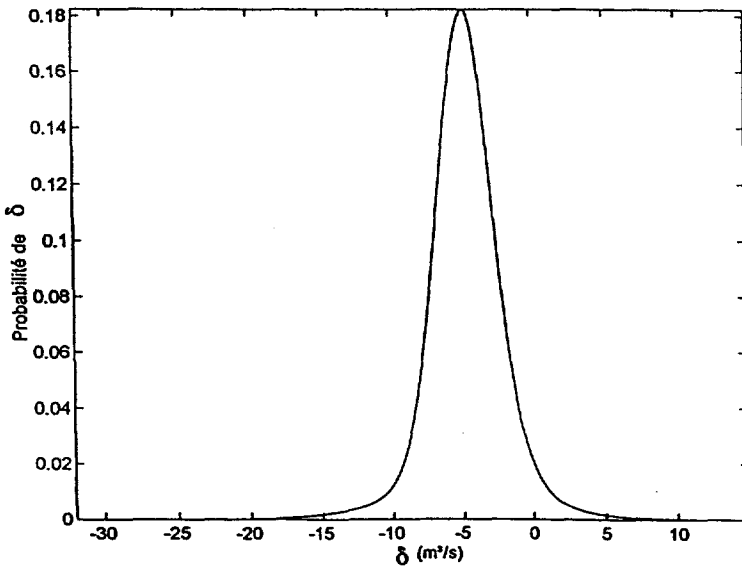


Figure 3b Fonction de probabilité inconditionnelle *a posteriori* de l'amplitude de changement pour la station 8

Unconditional posterior distribution of the magnitude of shift for station 8.

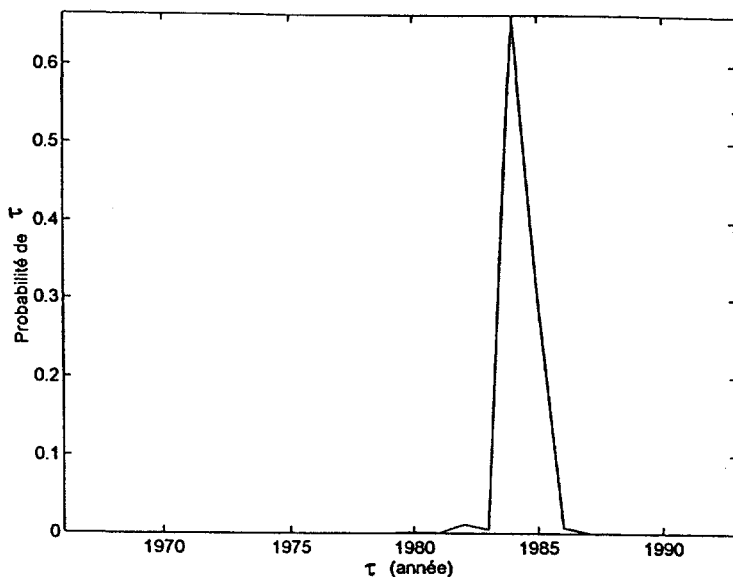


Figure 4a Fonction de probabilité *a posteriori* de la date de changement pour la station 13.

Posterior probability function of change date for station 13.

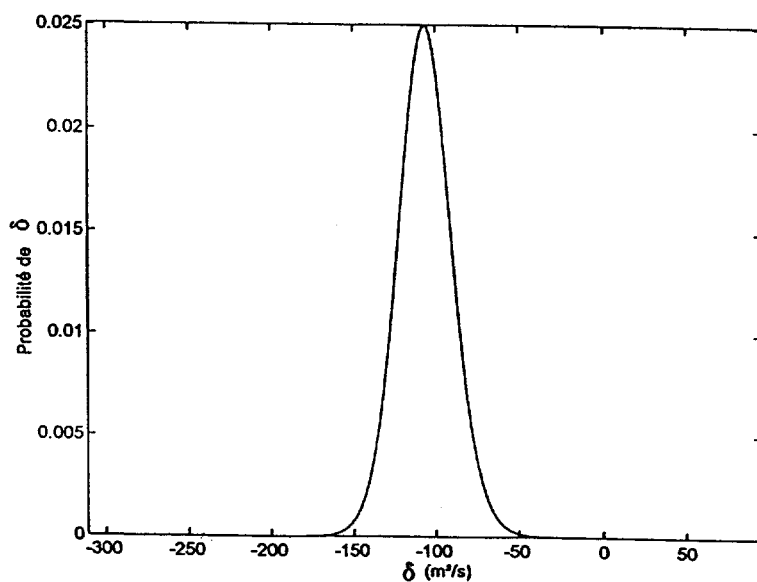


Figure 4b Fonction de probabilité inconditionnelle *a posteriori* de l'amplitude de changement pour la station 13.

Unconditional posterior distribution of the magnitude of shift for station 13.

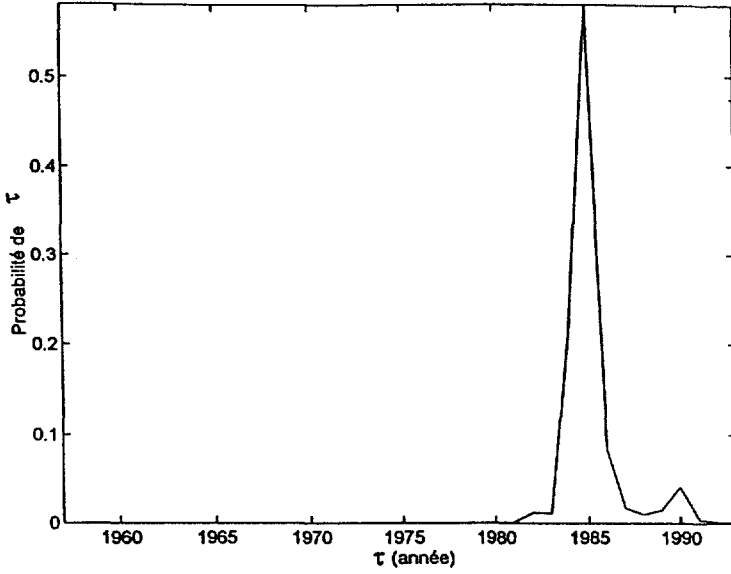


Figure 5a Fonction de probabilité *a posteriori* de la date de changement pour la station 14.
Posterior probability function of change date for station 14.

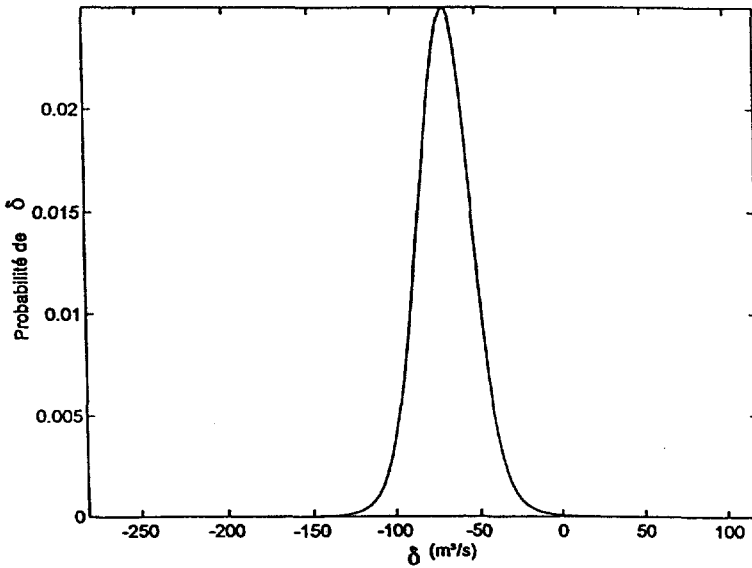


Figure 5b Fonction de probabilité inconditionnelle *a posteriori* de l'amplitude de changement pour la station 14.
Unconditional posterior distribution of the magnitude of shift for station 14.

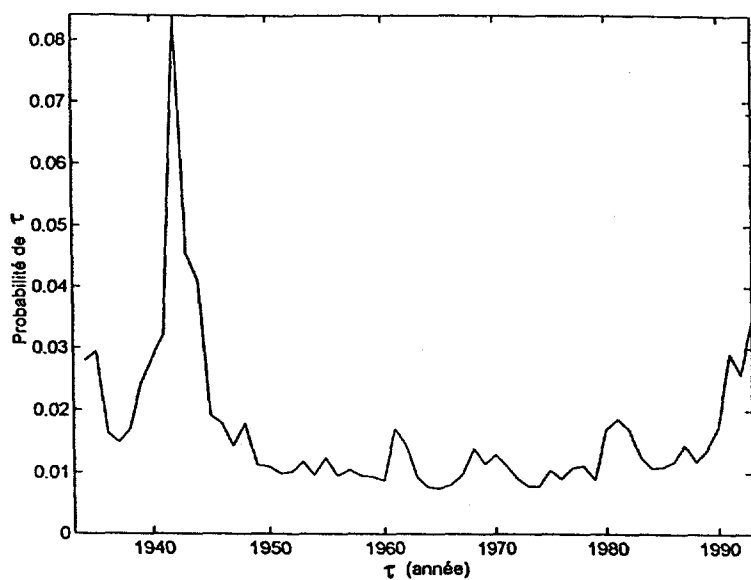


Figure 6a Fonction de probabilité *a posteriori* de la date de changement pour la station 15.

Posterior probability function of change date for station 15.

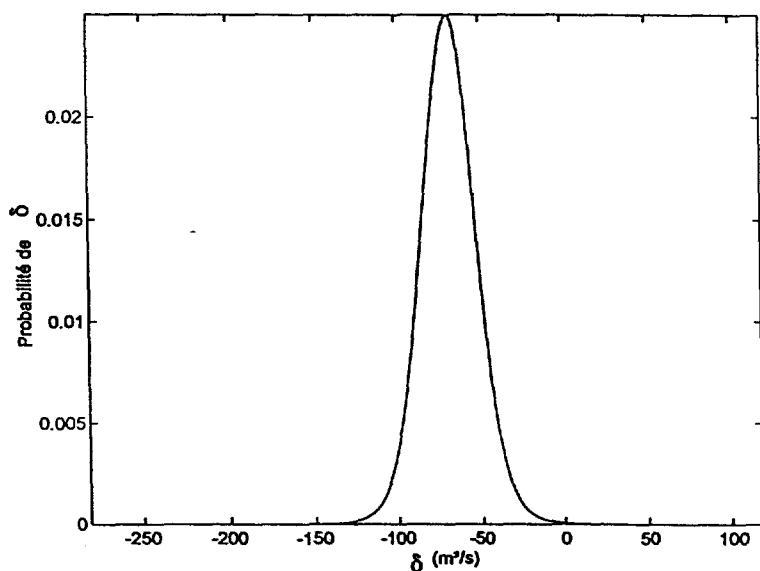


Figure 6b Fonction de probabilité inconditionnelle *a posteriori* de l'amplitude de changement pour la station 15.

Unconditional posterior distribution of the magnitude of shift for station 15.

Il est extrêmement important de souligner qu'on ne peut pas conclure à une modification climatique, pour une station donnée sur la seule base de l'application d'un test. L'exercice effectué dans cette section est tout simplement destiné à faire un premier pas dans l'analyse des séries des stations sélectionnées. Même dans le cas où les résultats semblent indiquer qu'un « changement » s'est produit durant une période donnée, il faudra valider les résultats avec d'autres tests, vérifier l'existence d'un tel changement dans d'autres séries, et expliquer les causes du phénomène observé. De plus, l'étude et la détection des modifications climatiques, phénomènes qui se produisent en général à grande échelle, doivent se faire sur une base régionale rigoureuse plutôt que sur la base de séries de données provenant de différents sites étudiés indépendamment les unes des autres.

6 – CONCLUSIONS

Le présent travail a permis d'identifier une liste de stations hydrométriques qui semblent adaptées au suivi des modifications climatiques et de leurs impacts sur le cycle hydrologique. La capacité des séries de débits à fournir des indications sur d'éventuelles modifications climatiques dépend de la présence de « bruits » qui peuvent diminuer ou masquer le signal climatique. Ainsi, les stations retenues doivent satisfaire certaines conditions assez rigoureuses pour assurer une qualité adéquate des données hydrométriques recueillies. Pour le choix des stations dans la province du Québec, on s'est basé essentiellement sur les critères de sélection du réseau de bassins hydrométriques de référence, tout en apportant des nuances qui reflètent la spécificité de la province de Québec. Il est important de souligner la subjectivité de certains des critères utilisés, tel que celui imposant que moins de 10 % de la surface du bassin soit aménagée ou modifiée par rapport aux conditions naturelles. Les stations présentées dans cet article représentent le résultat d'une première sélection et des modifications pourront être apportées après l'intégration des stations sélectionnées par les différentes provinces, et la superposition des réseaux de stations hydrométriques et climatiques retenues.

La procédure bayésienne de LEE et HEGHINIAN (1977) a été appliquée aux données de débits moyens annuels des stations retenues sur la province de Québec. Cette procédure permet, pour chaque station, de calculer la probabilité qu'un changement de moyenne soit survenu une année donnée, d'identifier la date pour laquelle la probabilité de réalisation du changement est maximale, et de déterminer la distribution de probabilité de l'amplitude du changement. Certaines indications assez significatives de non-stationnarité ont été détectées pour plusieurs des séries étudiées. Pour cinq des stations retenues la date la plus probable d'occurrence du changement se situe autour des années 1983-1985. Cependant, il n'est pas possible de conclure à un changement sur la seule base de l'application de cette procédure bayésienne. La validation des résultats avec d'autres tests statistiques est nécessaire. Il est aussi nécessaire d'identifier si le changement est significatif et d'expliquer les causes du phénomène observé (est-il dû à un changement climatique ou au déplacement de la station de jaugeage par exemple). Il serait intéressant de classer et de comparer d'une façon systématique les résultats fournis par plusieurs tests ou procédures de détection de

variabilité ou de modifications climatiques dans les séries hydrologiques. Cette étude comparative suppose toutefois de connaître les performances inhérentes à chacun des tests en tenant compte de leurs hypothèses de base particulières. Le développement de tests régionaux, basés sur des apports cumulés spatialement, ou basés sur des techniques multivariées, pourrait aussi s'avérer fort intéressant.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été rendu possible grâce au soutien financier d'Environnement Canada. Les auteurs de l'article tiennent à exprimer leur reconnaissance à MM. Mario Haché, et Luc Perreault pour leur aide, à MM. Paul Pilon, et Michel Sli-vitzky, pour leurs commentaires et suggestions, ainsi que leurs collègues du groupe d'étude du réseau de bassins hydrométriques de référence. Les commentaires des réviseurs ont amélioré la qualité de l'article.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BERGER J.O., 1985. Statistical Decision Theory and Bayesian Analysis. Berlin, Springer.
- BERNIER J., 1994. Statistical detection of changes in geophysical series in Engineering Risk in Natural Resources Management. Duckstein L. and E. Parent (eds.), NATO Advanced Studies Institute Series, Series E – Vol. 275, Kluwer : 159-176.
- BODEN T.A., KAISER D.P., SEPANSKI R.J., STOSS F.W., 1994. Trends 93 : A compendium of data on global change. ORNL/CDIAC-65, Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tenn., USA.
- BUISHAND T. A., 1982. Some methods for testing the homogeneity of rainfall records, *J. Hydrol.*, 58, 11-27.
- CAVADIAS G.S., 1992. A survey of current approaches to modelling of hydrological time-series with respect to climate variability and change. Report prepared for the World Climate Programme – Water – Project A2, WMO/TD-N° 534, 50 pp.
- DICKEY D.A., FULLER W.A., 1979. Distribution of the estimators for autoregressive time series with a unit root. *J. of the Am. Statist. Assoc.*, 74, 427-431.
- Environnement Canada, 1989. Régions éco-climatiques du Canada. Direction du développement durable, série de classification écologique du territoire, n° 23, 118 pp.
- Environnement Canada, 1995. Le changement climatique. Série nationale d'indicateurs environnementaux. Bulletin EDE, service de la Conservation de l'environnement, (95)2, 10 pp.
- Environnement Canada, 1996a. HYDAT CD ROM : Données sur les eaux de surface et sur les sédiments jusqu'en 1994. ROM 2245.
- Environnement Canada, 1996b. Climate network rationalisation report, internal publication.
- EPSTEIN E.S., 1985. Statistical inference and prediction in climatology : A Bayesian approach, Meteorological Monographs. American Meteorological Society.
- FAUCHER D., OUARDA T. B.M.J., BOBÉE B., 1997. Revue bibliographique des tests de

- stationnarité ; rapport de recherche n° R-499, INRS-Eau, 66 pp.
- FISZ M., 1963. Probability theory and mathematical statistics, John Wiley & Sons Inc., New York.
- FULLER W. A., 1976. Introduction to statistical time series. John Wiley, New York.
- GROTCH S.L., 1991. The use of GCM to predict regional climatic change. *J. Clim.*, 4(3), 286-303.
- GULLETT D.W., SKINNER W.R., 1992. L'état du climat au Canada : les variations de la température au Canada 1895-1991. Rapport sur l'état de l'environnement n° 92-2, Environnement Canada, 36 pp.
- HIPEL K.W., MCLEOD A.I., 1994. Time series modelling of water resources and environmental systems. Elsevier Science B. V., Amsterdam, 1013 pp.
- HUBERT P., CARBONNEL J.P., CHAOUCHE A., 1989. Segmentation des séries hydro-météorologiques : application à des séries de précipitation et de débits de l'Afrique de l'Ouest. *J. Hydrol.*, 110, 349-367.
- I.P.C.C. (International Panel on Climate Change), 1995. Hydrology and freshwater ecology - Chapter 10 : Review Draft. IPCC Working Group II, 65 pp.
- KARL T.R., KNIGHT R.W., EASTERLING D.R., QUAYLE R.G., 1996. Indices of climate change for the United States, *Bull. of the Amer. Meteor. Soc.*, 77(2), 279-292.
- KITE G.W., HARVEY K.D.(eds.), 1992. Proceedings of the NHRI Workshop, n° 8 : Using hydrometric data to detect and monitor climatic change. Environnement Canada, National Hydrology Research Institute, Saskatoon, Saskatchewan, 247 pp.
- LAWFORD R.G., 1992. Hydrological indicators of climatic change : Issue or opportunity ? in Proceedings of the NHRI Workshop, n° 8 : Using hydrometric data to detect and monitor climatic change. Environnement Canada, National Hydrology Research Institute, Saskatoon, Saskatchewan : 9-20.
- LEE A.S.F., HEGHINIAN S.M., 1977. A Shift of the Mean Level in a Sequence of Independent Normal Random Variables : A Bayesian Approach. *Technometrics*, 19(4), 503-506.
- LETTENMAIER D. P., WOOD E.F., WALLIS J.R., 1994. Hydro-Climatological Trends in the Continental United States, 1948-88, *Journal of Climate*, 7, 586-607.
- MARONNA R., YOHAI V.J., 1978. A bivariate test for the detection of a systematic change in mean. *J. Am. Statist. Assoc.*, 73, 640-645.
- M.E.F.Q. (Ministère de l'Environnement et de la Faune), 1994. Annuaire hydrologique 1992-1993. Direction du milieu hydrique, AH-34, Québec, 148 pp.
- MEKIS E., HOGG W.D., 1998. Rehabilitation and analysis of Canadian daily precipitation time series, submitted to Atmosphere-Oceans.
- MITOSEK H.T., 1992. Occurrence of climate variability and change within the hydrological time series : A statistical approach. Report prepared for the World Climate Programme - Project A2, CP-92-05, IIASA, Laxenburg, Austria, 167 pp.
- OUARDA T. B.M.J., RASMUSSEN P. F., BOBÉE B., 1996. On the rational reduction of hydrometric networks. Proceedings of the 16th Annual American Geophysical Union, Hydrology Days, H. Morel-Seytoux (ed.), Hydrology Days Publications, Ca : 383-394.
- PERREAULT L., HACHÉ M., BOBÉE B., 1996. Analyse statistique des séries d'apports énergétiques. Rapport final du projet C2 de la Chaire industrielle en Hydrologie statistique. INRS-Eau, rapport de recherche no R-474, 183 pp.
- PERREAULT L., HACHÉ M., SLIVITZKY M., BOBÉE B., 1999. Detection of changes in precipitation and runoff over Eastern Canada and U.S. using a Bayesian approach. Stochastic environmental research and risk assessment, 13(3) (sous presse).
- PETTIT A.N., 1979. A nonparametric approach to the change point problem. *Applied Statistics*, 28(2), 126-135.
- PILON P.J., DAY T.J., YUZYK T.R., HALE R.A., 1996. Challenges facing surface water monitoring in Canada. *Canadian Water Resources Journal*, 21(2), 157-164.
- QUINN F.H., GUERRA B., 1986. Current perspectives on the Lake Erie water balance. *J. Great Lakes Res.*, 12(2), 109-116.

- SALAS J.D., BOES D.C., 1980. Shifting level modelling of hydrologic series. *Advances in Water Resources*, vol. 3.
- SLACK J.R., LANDWEHR J.M., 1992. Hydro-Climatic Data Network (HCDN): A U. S. Geological Survey streamflow data set for the United States for the study of climate variations, 1874-1988. U. S. Geological Survey, Open-File Report 92-129, Reston, Virginia, 171 pp.
- SNEYERS R., 1990. Sur l'analyse statistique des séries d'observations, OMM, Genève, Note technique N° 143, 192 pp.
- SOLOW A.R., 1988. A Bayesian approach to statistical inference about climatic change. *J. of Climate*, (1)5, 512-521.
- SRIKANTHAN R., MCMAHON T.A., IRISH J.L., 1983. Time series analysis of annual flows of Australian streams. *J. of Hydrology*, 66, 213-226.
- SRIKANTHAN, R., STEWART B.J., 1991. Analysis of maximum daily rainfall with regard to climatic change. International Hydrology and Water Resources Symposium, Perth, 2-4 October.
- The MathWorks Inc., 1997. MATLAB the language of technical computing, computation, visualization and programming, version 5, Natick, MA, 387 pp.
- TREMBLAY R., 1976. Décennie Hydrologique Internationale, Bassin représentatif - Rivière Eaton, traits caractéristiques du régime d'écoulement, Publication officielle du Ministère des Richesses Naturelles, Direction générale des eaux, Service de l'Hydrométrie, 69 pp.
- VILLENEUVE J.P., BOBÉE B., ST-MARTIN H., SLIVITZKY M., 1973. Méthodologie de rationalisation des réseaux hydrométriques. *Bulletin des Sciences Hydrologiques*, XVIII, (4)12, 459-471.
- W.M.O. (World Meteorological Organization), 1966. Climatic change. Technical Note, n° 79, WMO n° 195, TP 100.
- W.M.O. (World Meteorological Organization), 1988. Analyzing long time series of hydrological data with respect to climate variability and change. World Climate Program, WCAP-3, WMO/TD - n° 224.
- WORSLEY K.J., 1979. On the likelihood ratio test for a shift in location of normal populations. *J. Am. Stat. Assoc.*, 74, 365-367.